УДК 621.311.1.018.3

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ УЗЛОВ НАГРУЗКИ

Н.Н. Харлов

Томский политехнический университет
E-mail: rcr@tpu.ru

Определены составляющие энергетических спектров напряжений и токов узлов нагрузки с резкопеременным и быстроизменяющимся режимом работы. На основе расчетных соотношений предложен «энергетический критерий качества напряжения». Рассмотрен пример практического использования полученных результатов.

Современные узлы нагрузки являются, как правило, потребителями несинусоидальных токов [1, 2]. Уровень их несинусоидальности определяется, прежде всего, составом электроприемников с нелинейными вольтамперными характеристиками. В некоторых случаях несинусоидальность токов является следствием несинусоидальности напряжения из-за нелинейности вольтамперных характеристик и несинусоидальности токов в других узлах нагрузки. Математическое описание несинусоидальных режимов в настоящее время базируется на использовании рядов Фурье, обеспечивающих учет дискретных составляющих спектров режимных параметров [3, 4]. Наличие в составе узлов нагрузки электроприемников с резкопеременным и быстроизменяющимся режимом работы (таких как дуговые печи, сварка и др.) приводит к появлению в составе спектров напряжений и токов как дискретных, так и непрерывных составляющих.

Современные приборы контроля качества электрической энергии позволяют контролировать спектральный состав напряжений и токов с достаточно высокой точностью и с заданной периодичностью, представляя результаты каждого измерения в виде бесконечной периодической функции представленной рядом Фурье. Такие результаты получаются при обработке одного периода контролируемого процесса. Сопоставляя результаты последовательности измерений, можно обнаружить, что коэффициенты их рядов Фурье существенно отличаются. В особенности данное утверждение относится к узлам нагрузки, имеющим резкопеременный и быстроизменяющийся характер работы. В этом случае можно заключить, что контролируемые процессы не являются, строго говоря, периодическими, а представляют собой случайные процессы, математическое описание которых в форме рядов Фурье является некорректным. Важнейшими характеристиками случайных процессов являются, как известно, их энергетические спектры.

При проведении расчетов, связанных с определением уровня несинусоидальности, нормировании показателей качества электрической энергии, определения вносимого вклада отдельных потребителей в ухудшение качества электрической энергии необходимо определять значения этих характеристик случайных процессов. Таким образом, возникает задача определения энергетических спектров напряжений и токов в электрических сетях на основании выборочных результатов измерения спектральных характеристик в течение отдельных периодов основной частоты. Покажем возможность получения характеристик энергетического спектра на основе таких данных.

Случайный процесс изменения параметра режима $\zeta(t)$ представляется в форме модулированного гармонического сигнала с постоянной частотой ω_1:

$$\zeta(t) = \xi(t)\cos\omega_1 t + \eta(t)\sin\omega_1 t, \qquad (1)$$

где $\xi(t)$, $\eta(t)$ – случайные процессы.

На временном интервале $-NT \le t \le NT$ рассмотрим l-ую реализацию случайного процесса изменения напряжения или тока $\xi^{(l)}(t)$, продолжительностью $(2N+1)T$, где $T=2\pi/\omega_1=\text{const}$ – период основной частоты.

Выделив в пределах данного временного отрезка интервал времени продолжительностью T, заключенный между моментами времени $-T/2 \le t \le T/2$, определим на основе значений процесса $\xi^{(l)}(t)$ в пределах этого интервала бесконечный детерминированный периодический процесс $S_0^{(l)}(t)$

$$S_0^{(l)}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_{0k}^{'(l)} \cos k\omega_1 t + \sum_{k=1}^{\infty} A_{0k}^{''(l)} \sin k\omega_1 t,$$

где коэффициенты ряда определяются по формулам

$$A_{0k}^{'(l)} = \frac{2}{T}\int_{T/2}^{T/2} \zeta^{(l)}(t)\cos(k\omega_1 t)dt;$$

$$A_{0k}^{''(l)} = \frac{2}{T}\int_{T/2}^{T/2} \zeta^{(l)}(t)\sin(k\omega_1 t)dt.$$

Определим преобразование Фурье детерминированного процесса $S_0^{(l)}(t)$ на интервале $-T/2 \le t \le T/2$, полагая, что вне пределов этого интервала его значения равны нулю. Спектральная плотность преобразования определяется следующим выражением:

$$G_0^{(l)}(\omega) = \int_{-T/2}^{T/2} S_0^{(l)}(t)e^{-j\omega t}dt = \left[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k+1}2\omega A_{0k}^{'(l)}}{k^2\omega_1^2-\omega^2} + j\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^k 2k\omega_1 A_{0k}^{''(l)}}{k^2\omega_1^2-\omega^2}\right]\sin\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right).$$

Подобным образом определяются процессы $S_n^{(l)}(t)$ на основе значений процесса $\xi^{(l)}(t)$, заключен-

ных в пределах интервалов $(-T/2+nT)\le t\le (T/2+nT)$ и их спектральные плотности:

$$G_n^{(l)}(\omega)=\int_{-T/2+nT}^{T/2+nT} S_n^{(l)}(t)e^{-j\omega t}\,dt=$$

$$=\left[\begin{array}{l}\sum\limits_{k=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{k+1}2\omega A_{nk}^{'(l)}}{k^2\omega_1^2-\omega^2}+\\ +j\sum\limits_{k=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{k}2k\omega_1 A_{nk}^{''(l)}}{k^2\omega_1^2-\omega^2}\end{array}\right]\sin\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)e^{-j\frac{2n\pi\omega}{\omega_1}}.$$

Спектральная плотность l-й реализации случайного процесса определится как сумма спектральных плотностей $S_n^{(l)}(t)$, полученных на всех интервалах времени:

$$G^{(l)}(\omega)=\sum_{n=-N}^{n=N} G_n^{(l)}(\omega)=$$

$$=\sum_{n=-N}^{n=N}\left[\begin{array}{l}\sum\limits_{k=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{k+1}2\omega A_{nk}^{'(l)}}{k^2\omega_1^2-\omega^2}+\\ +j\sum\limits_{k=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{k}2k\omega_1 A_{nk}^{''(l)}}{k^2\omega_1^2-\omega^2}\end{array}\right]\sin\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)e^{j\frac{2n\pi\omega}{\omega_1}}.$$

Энергетический спектр процесса определяется в соответствии с [5] как предел удвоенного квадрата модуля полученной спектральной плотности, усредненной по времени и по ансамблю реализаций при $N\to\infty$:

$$F(\omega)=\lim_{N\to\infty}\frac{2}{T(2N+1)}m_1\{G^{(l)}(\omega)\bar{G}^{(l)}(\omega)\}=$$

$$=\lim\frac{2}{T(2N+1)}\times$$

$$\times m_1\left\{\sum_{n=-N}^{n=N}\left[\begin{array}{l}\sum\limits_{k=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{k+1}2\omega A_{nk}^{'(l)}}{k^2\omega_1^2-\omega^2}+\\ +j\sum\limits_{k=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{k}2k\omega_1 A_{nk}^{''(l)}}{k^2\omega_1^2-\omega^2}\end{array}\right]\sin\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)e^{-j\frac{2n\pi\omega}{\omega_1}}\times\right.$$

$$\left.\times\sum_{i=-N}^{i=N}\left[\begin{array}{l}\sum\limits_{m=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{m+1}2\omega A_{im}^{'(l)}}{m^2\omega_1^2-\omega^2}-\\ -j\sum\limits_{m=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{m}2m\omega_1 A_{im}^{''(l)}}{m^2\omega_1^2-\omega^2}\end{array}\right]\sin\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)e^{j\frac{2i\pi\omega}{\omega_1}}\right\}.$$

Здесь черта над $G(\omega)$ означает знак сопряжения, а символ $m_1\{\}$ – определения математического ожидания.

После перемножения и некоторых преобразований получаем следующую формулу для определения энергетического спектра рассматриваемого случайного процесса:

$$F(\omega)=\lim_{N\to\infty}\frac{4\omega_1\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)}{\pi(2N+1)}\times$$

$$\times m_1\left\{\begin{array}{l}\sum\limits_{n=-N}^{n=N}\sum\limits_{i=-N}^{i=N}e^{j\frac{-2(n-i)\pi\omega}{\omega_1}}\left(\sum\limits_{k=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{k+1}A_{nk}^{'(l)}\omega+j(-1)^k A_{nk}^{''(l)}k\omega_1}{k^2\omega_1^2-\omega^2}\right)\times\\ \left(\sum\limits_{m=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^{m+1}A_{im}^{'(l)}\omega-j(-1)^m A_{im}^{''(l)}m\omega_1}{m^2\omega_1^2-\omega^2}\right)\end{array}\right\}=$$

$$=\lim_{N\to\infty}\frac{4\omega_1\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)}{\pi(2N+1)}\times$$

$$\times m_1\left\{\sum_{n=-N}^{n=N}\left(\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k+m}(A_{nk}^{'(l)}A_{nm}^{'(l)}\omega^2+A_{nk}^{''(l)}A_{nm}^{''(l)}km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2-\omega^2)(m^2\omega_1^2-\omega^2)}\right)\right\}+$$

$$+\lim_{N\to\infty}\frac{4\omega_1\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)}{\pi(2N+1)}\times$$

$$\times m_1\left\{\sum_{n=-N}^{n=N}\sum_{\substack{i=-N\\ n\ne i}}^{i=N}e^{j\frac{-2(n-i)\pi\omega}{\omega_1}}\left(\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k+m}(A_{nk}^{'(l)}A_{im}^{(l)''}\omega^2+A_{nk}^{'(l)}A_{im}^{''(l)}km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2-\omega^2)(m^2\omega_1^2-\omega^2)}\right)\right\}.$$

В частности, если случайные процессы $\xi(t),\eta(t)$ – стационарные, то математические ожидания попарных произведений коэффициентов Фурье не будут зависеть от номеров индексов n,i и от их разности. Далее рассматривается этот случай.

При принятом допущении первое слагаемое можно переписать в следующем виде:

$$F_1(\omega)=\lim_{N\to\infty}\frac{4\omega_1\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)}{\pi(2N+1)}\times$$

$$\times\left\{\sum_{n=-N}^{n=N}\left(\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k+m}(m_1\{A_{nk}^{'(l)}A_{nm}^{'(l)}\}\omega^2+m_1\{A_{nk}^{''(l)}A_{nm}^{''(l)}\}km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2-\omega^2)(m^2\omega_1^2-\omega^2)}\right)\right\}=$$

$$=\frac{4\omega_1}{\pi}\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)\times$$

$$\times\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k+m}(m_1\{A_k^{'(l)}A_m^{'(l)}\}\omega^2+m_1\{A_k^{''(l)}A_m^{''(l)}\}km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2-\omega^2)(m^2\omega_1^2-\omega^2)}=$$

$$=\frac{4\omega_1}{\pi}\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)\times\left[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(a_k^{'2}+\sigma_k^{'2})\omega^2+(a_k^{''2}+\sigma_k^{''2})k^2\omega_1^2}{(k^2\omega_1^2-\omega^2)^2}+\right.$$

$$\left.\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{\substack{m=1\\ k\ne m}}^{\infty}\frac{(-1)^{k+m}((a_k^{'}a_m^{'}+K_{0km}^{'})\omega^2+(a_k^{''}a_m^{''}+K_{0km}^{''})km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2-\omega^2)(m^2\omega_1^2-\omega^2)}\right],$$

где $a_k', a_k'', \sigma_k', \sigma_k''$ – математические ожидания и дисперсии, а K_{0km}', K_{0km}'' – корреляционные моменты соответствующих коэффициентов Фурье, определяемые для случаев, когда $n=i$.

Второе слагаемое после преобразований представляется в следующем виде:

$$F_2(\omega)=\lim_{N\to\infty}\frac{4\omega_1\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)}{\pi(2N+1)}\times$$

$$\times\sum_{p=1}^{2N}(2N+1-p)[h_p(\omega)+h_p(-\omega)]=4\frac{\omega_1}{\pi}\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)\times$$

$$\times\lim_{N\to\infty}\sum_{p=1}^{\infty}\left(1-\frac{p}{(2N+1)}\right)(h_p(\omega)+h_p(-\omega))=$$

$$=4\frac{\omega_1}{\pi}\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)\sum_{p=1}^{\infty}(h_p(\omega)+h_p(-\omega)),$$

где $p=n-i$;

$$h_{n-i}(\omega) = h_p(\omega) =$$

$$= m_1 \left\{ e^{-j\frac{2(n-i)\pi\omega}{\omega_1}} \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+m}(A_{nk}^{'(l)} A_{im}^{'(l)} \omega^2 + A_{nk}^{''(l)} A_{im}^{''(l)} km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2 - \omega^2)(m^2\omega_1^2 - \omega^2)} \right\} =$$

$$= e^{-j\frac{2p\pi\omega}{\omega_1}} \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+m}((a_k^{'} a_m^{'} + K_{pkm}^{'})\omega^2 + (a_k^{''} a_m^{''} + K_{pkm}^{''})km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2 - \omega^2)(m^2\omega_1^2 - \omega^2)}.$$

Здесь

$$a_k^{'} = m_1\{A_k^{'(l)}\}, \quad a_m^{'} = m_1\{A_m^{'(l)}\},$$

$$a_k^{''} = m_1\{A_k^{''(l)}\}, \quad a_m^{''} = m_1\{A_m^{''(l)}\},$$

$$K_{pkm}^{'} = m_1\{(A_{nk}^{'(l)} - a_k^{'})(A_{im}^{'(l)} - a_i^{'})\},$$

$$K_{pkm}^{''} = m_1\{(A_{nk}^{''(l)} - a_k^{''})(A_{im}^{''(l)} - a_i^{''})\}.$$

Если математические ожидания попарных произведений коэффициентов Фурье не зависят от разности p, выражение для $F_2(\omega)$, используя соотношения, приведенные, например, в [6], можно переписать в следующем виде:

$$F_2(\omega) = \frac{4\omega_1 \sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right)}{\pi} \sum_{p=1}^{\infty}(h_p(\omega) + h_p(-\omega)) =$$

$$= \frac{4\omega_1}{\pi}\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right) \times$$

$$\times \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+m}(m_1\{A_{nk}^{'(l)} A_{im}^{'(l)}\}\omega^2 + m_1\{A_{nk}^{''(l)} A_{im}^{''(l)}\}km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2 - \omega^2)(m^2\omega_1^2 - \omega^2)} \times$$

$$\times 2\cos\left(\frac{2p\pi\omega}{\omega_1}\right) = \frac{4\omega_1}{\pi}\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right) \times$$

$$\times \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+m}((\tilde{a}_k^{'} \tilde{a}_m^{'} + \tilde{K}_{km}^{'})\omega^2 + (\tilde{a}_k^{''} \tilde{a}_m^{''} + \tilde{K}_{km}^{''})km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2 - \omega^2)(m^2\omega_1^2 - \omega^2)} \times$$

$$\times \left(\frac{2\pi}{T} \sum_{\nu=-\infty}^{\nu=\infty} \delta(\omega + \nu\omega_1) - 1\right).$$

Здесь $\tilde{a}_k'$, $\tilde{a}_k''$ – математические ожидания, а K_{km}', K_{km}'' – корреляционные моменты соответствующих коэффициентов Фурье, определяемые для случая, когда $n \neq i$.

Полученные формулы позволяют определить дискретную и непрерывную составляющие энергетического спектра процесса:

$$F_Д(\omega) = \frac{4\omega_1}{\pi}\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right) \times$$

$$\times \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+m}((\tilde{a}_k^{'} \tilde{a}_m^{'} + \tilde{K}_{km}^{'})\omega^2 + (\tilde{a}_k^{''} \tilde{a}_m^{''} + \tilde{K}_{km}^{''})km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2 - \omega^2)(m^2\omega_1^2 - \omega^2)} \times$$

$$\times \frac{2\pi}{T} \sum_{\nu=-\infty}^{\nu=\infty} \delta(\omega + \nu\omega_1). \qquad (2)$$

$$F_H(\omega) = \frac{4\omega_1}{\pi}\sin^2\left(\frac{\pi\omega}{\omega_1}\right) \times$$

$$\times \left[\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+m}((a_k^{'} a_m^{'} + K_{0km}^{'})\omega^2 + (a_k^{''} a_m^{''} + K_{0km}^{''})km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2 - \omega^2)(m^2\omega_1^2 - \omega^2)} - \right.$$

$$\left. - \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+m}((\tilde{a}_k^{'} \tilde{a}_m^{'} + \tilde{K}_{km}^{'})\omega^2 + (\tilde{a}_k^{''} \tilde{a}_m^{''} + \tilde{K}_{km}^{''})km\omega_1^2)}{(k^2\omega_1^2 - \omega^2)(m^2\omega_1^2 - \omega^2)} \right]. \qquad (3)$$

Полученные выражения дискретной и непрерывной составляющих спектров позволяют ввести «энергетический критерий качества напряжения», учитывающий случайный характер изменения режима электрической сети и присутствие в спектре напряжения непрерывной составляющей. Данный критерий представляет собой отношение полной мощности спектра исследуемого напряжения к мощности нормативного спектра напряжения с синусоидальной формой и постоянной, соответствующей номинальному напряжению амплитудой $\sqrt{2}\,U_H$:

$$K_{UЭ} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F_Д(\omega)d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} F_H(\omega)d\omega) - \int_{-\infty}^{\infty} F_{ном}(\omega)d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} F_{ном}(\omega)d\omega} 100\%,$$

где

$$\int_{-\infty}^{\infty} F_{ном}(\omega)d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} 2\pi U_H^2 [\delta(\omega + \omega_1) + \delta(\omega - \omega_1)]d\omega = 4\pi U_H^2.$$

На основе полученных соотношений проведено исследование энергетических спектров напряжений и токов на одном из предприятий со значительным количеством электроприемников с нелинейными вольтамперными характеристиками и переменным характером работы. Изменение нагрузки по отношению к мощности питающего трансформатора находилось в интервале 20...45 %. Измерения выполнены прибором AR-5 производства фирмы Circutor (Испания). Предварительным исследованием установлено, что процессы изменения напряжений и токов в основном соответствуют сделанным в настоящей статье допущениям относительно стационарности процессов $\xi(t), \eta(t)$ (1). Всего было получено 7 реализаций процессов изменения напряжений и токов на суточных интервалах времени, причем в течение суток контроль параметров режима осуществлялся с интервалом в 20 мин. Представление об уровне искажения напряжений и токов в узле подключения предприятия (шины 0,4 кВ понизительной подстанции) дают значения их коэффициентов несинусоидальности, рис. 1.

Составляющие энергетических спектров напряжения и тока одной из фаз, рассчитанные по ур. (2, 3) приведены на рис. 2, 3.

Значение критерия $K_{UЭ}$ составило 11,8 %. Мощность непрерывной составляющей энергетического спектра напряжения составила 0,167 % от суммарной мощности процесса. Мощность непрерывной составляющей энергетического спектра тока составила 16,85 % от суммарной мощности процесса.

Выводы

1. Выборочный контроль показателей качества электрической энергии обеспечивает определение дискретной и непрерывной составляющих энергетического спектра напряжений и токов, что позволяет более полно характеризовать режимы и качество напряжения в узлах электриче-

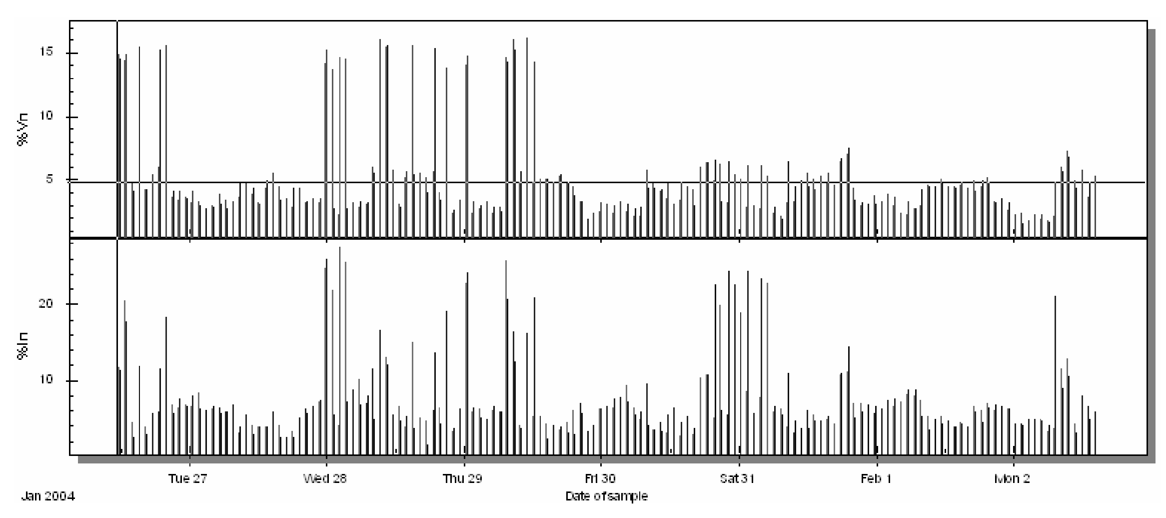


Рис. 1. *Значения коэффициентов несинусоидальности напряжения и тока в узле нагрузки*

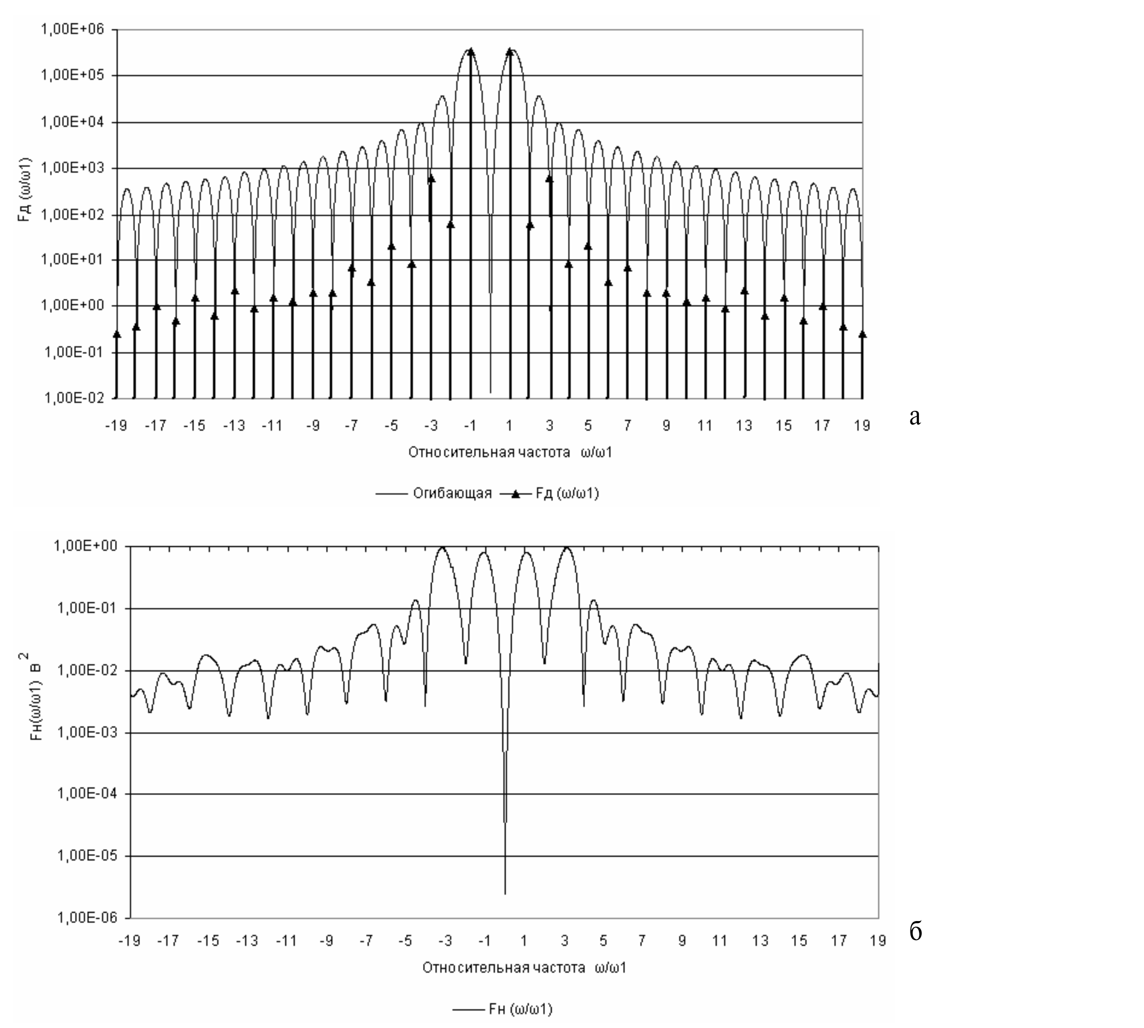


Рис. 2. *Дискретная (а) и непрерывная (б) составляющие энергетического спектра напряжения узла нагрузки*

ских сетей с резкопеременными и быстроизменяющимися процессами изменения нагрузок.

2. Полученные расчетные соотношения обеспечивают определение т.н. «энергетического критерия качества напряжения», представляющего собой обобщение показателей качества напряжения по отклонениям, колебаниям и несинусоидальности. Преимущество данного критерия по сравне-

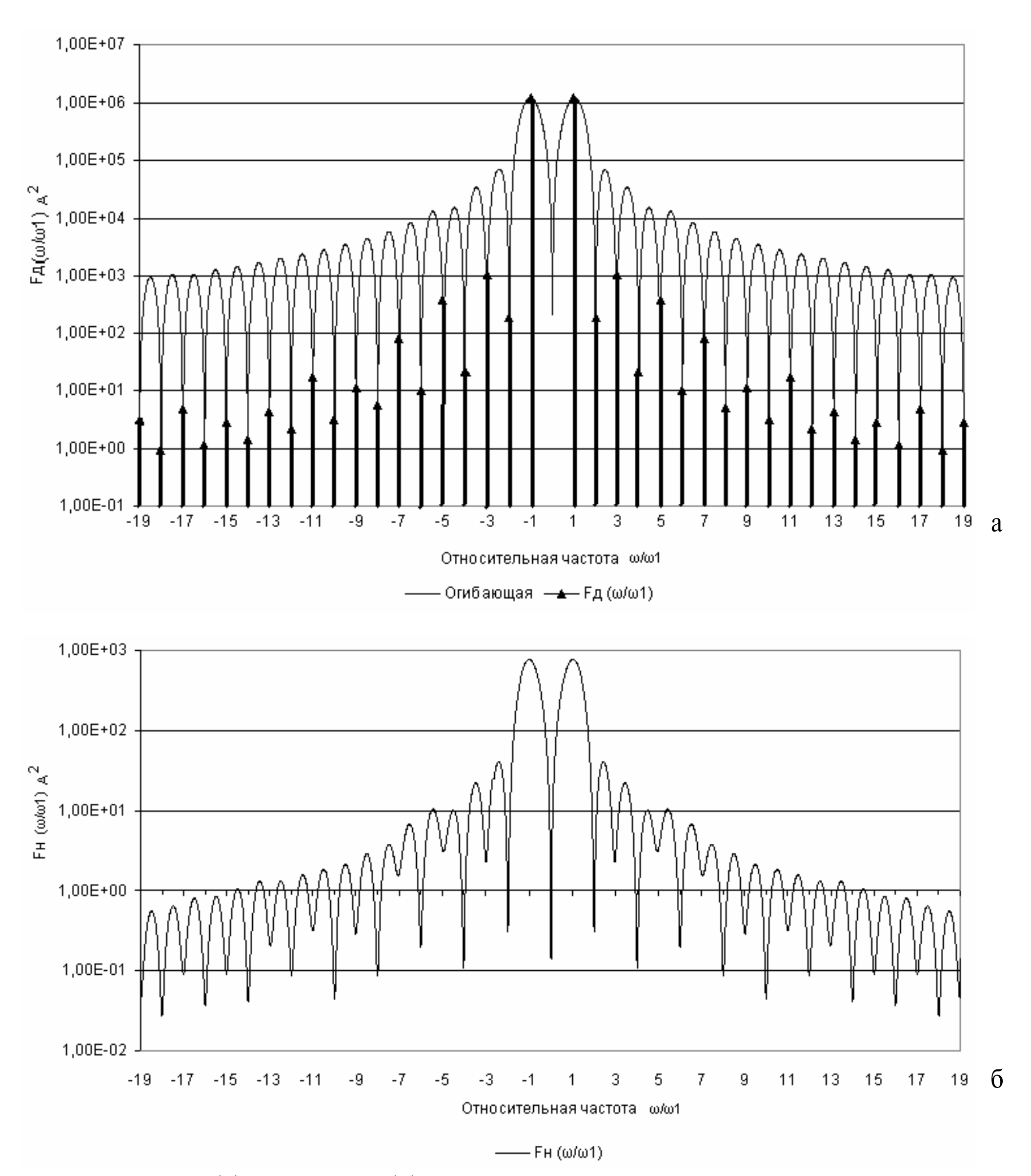


Рис. 3. *Дискретная (а) и непрерывная (б) составляющие энергетического спектра тока узла нагрузки*

нию с существующими заключается в возможности учета случайного характера изменения параметров режима, присутствия в спектрах напряжений и токов как дискретных, так и непрерывных составляющих, их влияния на потери электрической энергии и на нагрев оборудования.

3. Значительный вес непрерывной составляющей энергетического спектра тока в суммарной мощности процесса при переменном характере нагрузки говорит о необходимости учета этой составляющей при определении потерь электрической энергии в элементах электрической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гармоники в электрических системах / Пер с англ. Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.: ил.
2. Харлов Н.Н. Спектры токов электрических нагрузок городских электрических сетей // Ползуновский альманах (АГТУ). – 2004. – № 4. – С. 252–255.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 184 с.
4. Кучумов Л.А., Харлов Н.Н., Картасиди Н.Ю., Пахомов А.В., Кузнецов А.А. Использование метода гармонического баланса для расчета несинусоидальных и несимметричных режимов в системах электроснабжения // Электричество. – 1999. – № 12. – С. 10–22.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. I. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Советское радио, 1974. – 552 с.: ил.
6. Микусинский Я., Сикорский Р. Элементарная теория обобщенных функций. Ч. I. Пер. с англ. – М.: Иностранная лит-ра, 1959. – 80 с.